

頭部運動を活用する四脚ロボットの CPG 制御

CPG-based Control for Quadruped Robot That Exploits Head Motion

○鈴木朱羅*, 大脇大*, 福原洸*,**, 加納剛史*, 石黒章夫*

○Shura Suzuki*, Dai Owaki*, Akira Fukuhara*,**, Takeshi Kano* and Akio Ishiguro*

*東北大学, **日本学術振興会

*Tohoku University, **Japan Society for the Promotion of Science

キーワード： 四脚ロボット (quadruped robot), 自律分散制御 (decentralized control),
CPG (Central Pattern Generator), 姿勢反射 (postural reflex)

連絡先： 〒980-8577 仙台市青葉区片平 2-1-1 東北大学 電気通信研究所 石黒・加納研究室
鈴木朱羅, Tel.: (022)217-5465, Fax.: (022)217-5464, E-mail: shura@riec.tohoku.ac.jp

1. はじめに

四足動物は移動速度や自らを取り巻く環境、さらには動物種に応じて多彩な運動パターン（歩容）を発現することで状況に応じて適応的かつ効率的な振る舞いを生成する¹⁾。例えば、散歩中のイヌが歩行や走行を使い分けることは身近に観察できるが、これは移動速度に応じてエネルギー効率的に最適となる歩容を選択しているためと考えられている。このような精緻な歩容生成メカニズムを解明できれば、生物学的貢献のみならず、四脚動物に比肩する移動能力を持つロボットの実現につながることを期待される。

四足動物の歩容生成メカニズムを理解する上で重要となる知見として除脳ネコ*を用いた神経生理学的実験^{2,3)}が挙げられる。除脳ネコは自発的に運動を生成しないが、中脳の歩行誘発野と呼ばれる部位に電気刺激を与えることでトレッ

ドミル上を歩行する。さらに、与える電気刺激とトレッドミルの速度に応じて歩行から走行へと歩容を変化させることが知られている。この実験から、四脚動物の歩容は脳や高位の神経系による中央集権的な制御によるものではなく、脊髄に内在するCPG(Central Pattern Generator)と呼ばれる神経回路網が中核を担い、自律分散的に生成されていると考えられてきた。

このような背景から著者らは、適応的な歩容生成を可能とするCPGモデルの構築を試みてきた。そして、神経結合なしに局所的な力覚フィードバックのみで各脚の運動の協調を可能とする新奇なCPGモデルを提案した⁴⁾。同制御則は四脚ロボットに実装され、移動速度や身体特性に応じてさまざまな歩容の再現に成功した^{4,5)}。しかしながら、四足動物が高速移動時に発現する歩容への歩容遷移の再現は不十分であり、いまだあらゆる歩容を再現可能なモデルの構築には至っていない。

*除脳ネコとは間脳の部分を切断し、大脳皮質と皮質下の連絡を絶ったネコ。

そこで本研究では、「同一の CPG モデルによるあらゆる四脚動物の歩容の再現」という著者らの最終目的を達成するために、高速移動領域への歩容遷移に焦点をあて、その再現を試みる。この目的のため著者らは頭部の運動に着目した。Minetti らの報告⁶⁾から、移動運動中のウマの頭部は周期運動を示し、歩容に応じてその運動が大きく変容することが確認されている。高速移動領域においては頭部の運動の振り角は 50 度程度と大きく⁷⁾、さらにウマの頭部の質量は全体重の 10% 近くを占めている⁸⁾ため、頭部の運動が歩容生成に及ぼす影響は無視できない程度に大きいと考えられる。本稿では、前報で提案した姿勢反射メカニズムを導入した CPG モデル⁹⁻¹¹⁾において身体パラメータに応じた歩容の変化が確認されたので報告する。

2. 数理モデル

2.1 機構系

図 1 左に本章で用いる四脚ロボットの全体像を示す。頭部の運動が歩容の生成に及ぼす影響に焦点をあて議論するため、頭部、胴体および脚から構成されるシンプルな構造とした。頭部と胴体を結合する首関節には、pitch 方向のみ自由度を有する受動バネを実装した。同図右に示すように、各脚には 2 種類のアクチュエータが実装されており、これらにより肩関節および腰関節の回転運動と、脚軸方向の伸縮運動が可能となる。各脚に 1 つの位相振動子を実装し、位相 ϕ_i (ここで $i = 1 \sim 4$ は脚を識別する番号、Left Fore(LF): 1, Left Hind(LH): 2, Right Fore(RF): 3, Right Hind(RH): 4) に応じて各脚を制御することで、遊脚および支持脚期の運動を生成する(詳細は 2.2 節)。各脚の足先には、脚軸方向の床反力 N_i [N] を検知可能な圧力センサを実装した。また、頭部の傾きを検知するため、首関節に平衡位置からの変位 ψ [rad] を検知する角度センサを実装した。首関節の角度 ψ

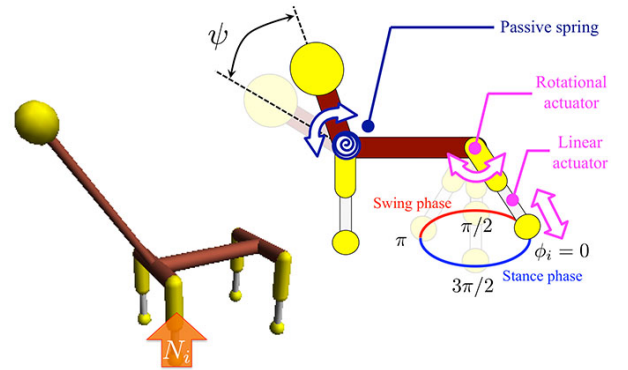


Fig. 1 頭部運動を活用する四脚ロボット。
Quadruped robot model that exploits head motion.

は平衡位置から前傾する方向を正とした。

2.2 制御系

著者らは、これまで神経的結合を用いなくとも局所的な力覚情報のみから各脚の運動の状況依存的な協調を可能とする CPG モデルを提案し⁴⁾、さまざまな四脚動物の歩容を再現してきた^{4,5)}。さらに前報⁹⁻¹¹⁾では、同 CPG モデルに簡単な姿勢反射メカニズムを導入することで頭部の運動を活用した rotary gallop の再現や歩容遷移の再現に成功した。本項では、この CPG モデルおよび反射メカニズムについて説明する。

各脚は位相振動子の角度 ϕ_i に応じて、回転方向ならびに直動方向のアクチュエータを駆動することで制御される。具体的には、アクチュエータの目標角度 $\bar{\theta}_i$ および目標長 \bar{l}_i は位相振動子の位相に応じて次式のように調整される：

$$\begin{aligned}\bar{\theta}_i &= -C_{amp} \cos \phi_i \\ \bar{l}_i &= L_0 - L_{amp} \sin \phi_i\end{aligned}\quad (1)$$

ここで、 C_{amp} は目標角度の振幅、 L_{amp} 、 L_0 は目標長の振幅および基準長を表す。上記の目標角度および目標長に基づき、各アクチュエータは PD 制御される。そのため、脚は位相が $0 < \phi_i \leq \pi$ のときは脚を地面から上げ前方に降り出す遊脚期、位相が $\pi < \phi_i \leq 2\pi$ のときは脚が地面に接地し後方に蹴り出す支持脚期となる(図 1)。

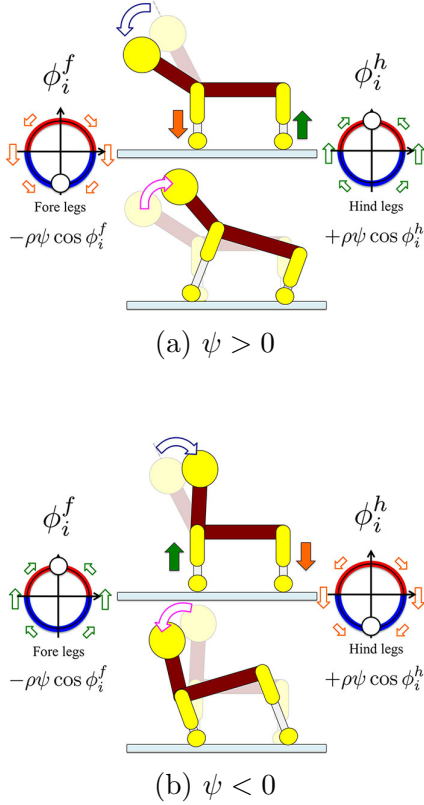


Fig. 2 姿勢反射メカニズム.
Postural reflex mechanism.

CPG を構成する位相振動子の時間発展は次式で記述される：

$$\begin{aligned}\dot{\phi}_i^f &= \omega - \sigma N_i \cos \phi_i^f - \rho \psi \cos \phi_i^f \\ \dot{\phi}_i^h &= \omega - \sigma N_i \cos \phi_i^h + \rho \psi \cos \phi_i^h\end{aligned}\quad (2)$$

ここで、 ϕ_i^f および ϕ_i^h はそれぞれ、前脚および後脚の位相振動子の位相を示す。 ω [rad/s] は位相振動子の固有角速度、 σ [rad/N·s] および ρ [1/s] は各フィードバック項のゲインを示す。

第2項は、局所的な力覚情報 N_i のみを用いて脚の協調運動を可能とする項⁴⁾である。本項の物理的効果は、脚が身体を支えている間 ($N_i > 0$) は、そのまま支持脚であり続ける効果である。局所的な力覚情報 N_i には各時刻において「他の脚がどれくらい身体を支持しているか」という物理的な情報が含まれるため、各脚の状態を神経的な情報伝達によって知らなくとも、本フィードバック項により状況依存的に各脚の協調運動を生成することが可能となる。

Table 1 四脚ロボットのパラメータ.
Parameters of quadruped robot.

Parameters	Value	[Unit]
Head mass	0.10	[kg]
Total mass	1.25	[kg]
Leg length	0.12	[m]
Shoulder (Hip) length	0.12	[m]
Trunk length	0.17	[m]
Spring constant of neck joint	2.40	[N·m/rad]
σ	0.60	[rad/N·s]
ρ	10.0	[1/s]
C_{amp}	0.1π	[rad]
L_{amp}	0.006	[m]

第3項は、多くの哺乳類で有することが確認されている姿勢反射^{12,13)}をモデル化した項である。姿勢反射とは、身体的位置や姿勢、運動における平衡を保つための反射であり、視覚、前庭覚、深部感覚などの感覚情報に応じて生成される。本制御則では、数多く存在する姿勢反射の中でも、首の角度に応じて四肢の筋緊張を誘因する緊張性頸反射^{12,13)}に着目し、本項を設計した。具体的には、図2に示すように、頭部が前傾し $\psi > 0$ となるときは前脚を伸長し後脚を短縮することで姿勢を維持し (図2(a))、一方頭部が後傾し $\psi < 0$ となるときは前脚を短縮し後脚を伸長することで姿勢を維持する効果をもたらす項となっている (図2(b))。これにより、頭部の傾きに応じて姿勢を維持するような脚の協調運動メカニズムが追加され、高速移動領域における姿勢安定化が期待できる。

3. シミュレーション実験

動力学計算エンジン ODE¹⁴⁾(Open Dynamics Engine) を用い、検証実験を行った。本実験では、位相振動子の固有角速度 ω [rad/s] と首の長さ [m] の変化による発現する歩容の変化の検証をした。 ω の値は 6 ~ 23 [rad/s]、首の長さ

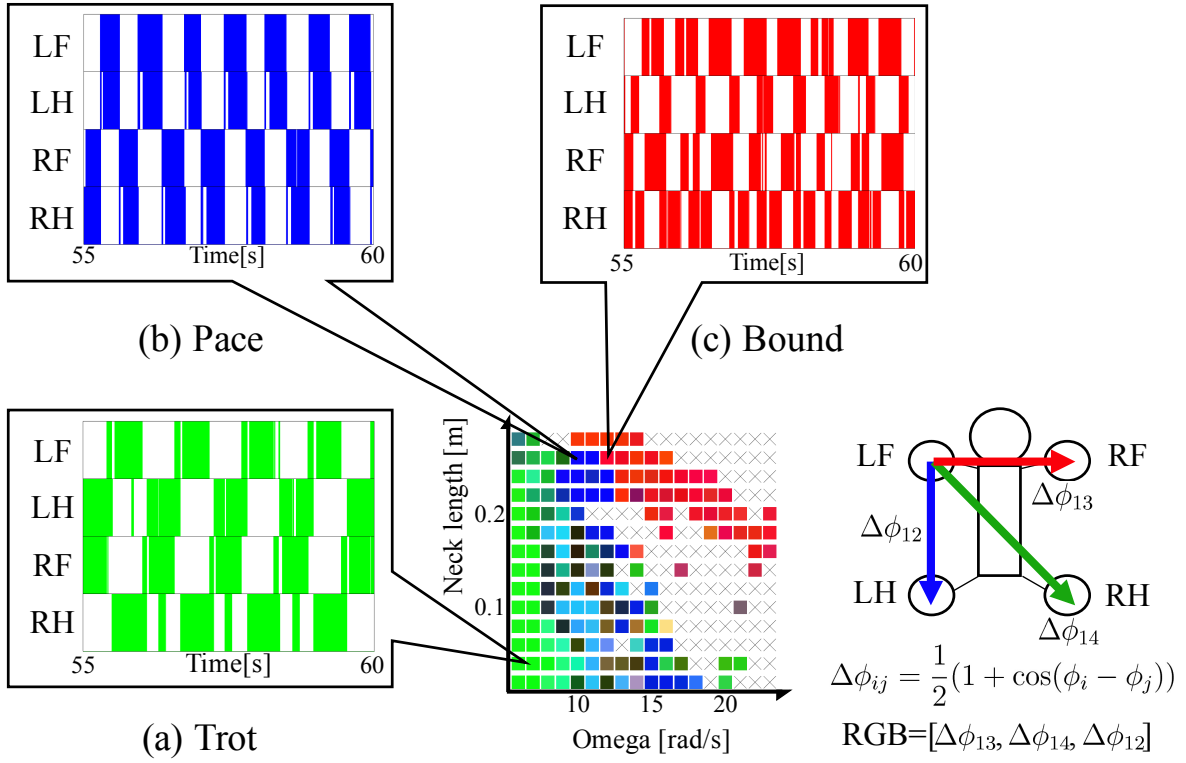


Fig. 3 各脚の位相振動子の位相差とゲイトダイアグラム。
Phase differences between oscillators and gait diagrams.

は $0.02 \sim 0.28$ [m] の範囲で変化させ、それぞれのパラメータにおいて 60 秒間の歩行実験を行った。他のパラメータは表 1 に示す。

実験の結果を図 3 に示す。歩行実験において転倒したパラメータを \times で示し、定常歩行したパラメータは脚の位相関係に応じて着色されている。脚の位相関係 $\Delta\phi_{ij}$ は次式で計算した：

$$\Delta\phi_{ij} = \frac{1}{2}(1 + \cos(\phi_i - \phi_j)) \quad (3)$$

それぞれの位相関係の値を着色する色の RGB 成分とした。 ϕ_{12} は青、 ϕ_{13} は赤、 ϕ_{14} は緑成分を示している。そのため、左前脚の位相に対して、右後脚の位相が同期し、他の脚の位相が同期する trot の場合は緑、左後脚の位相が同期し、他の脚の位相が同期する pace の場合は青、左後脚の位相が同期し、他の脚の位相が同期する bound の場合は赤で着色される。各歩容を示したパラメータのゲイトダイアグラムを図 3(a),(b),(c) に示した。ゲイトダイアグラムの着色部分は各脚の支持脚期 ($N_i > 0$) を示す。

図 3 左から、首の長さが短い場合、 ω の変化に応じて walk から pace への遷移のみ発現するが、首の長さが長い場合、 ω の変化に応じて walk から pace, pace から bound という高速領域への歩容遷移が確認できた。これは、提案制御則による姿勢安定化効果により、首が長くても不安定になり転倒することなく、高速領域の歩容が発現したためだと考えられる。

4. おわりに

本稿では、頭部の運動が高速移動領域への歩容遷移に与える影響について議論するため、著者らが提案した CPG モデルを用いて頭部を有する四脚ロボットの歩行実験を動力学シミュレーション上で行った。姿勢反射メカニズムによって首が長くとも姿勢を安定化させることが可能となり、高速移動領域で示す bound 歩容への遷移が確認された。今後は、各歩容中の運動学的解析およびロボット実機による検証実験を行い、

歩容の発現機序の解明を目指す。

謝辞

本研究の一部は、JST CREST（グラント番号：JP-MJCR14D5）の支援を受けたものである。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) E. Muybridge: *Animals in motion*, Dover Publications (1957)
- 2) T. G. Brown: The intrinsic factors in the act of progression in the mammal, *Proc. R. Soc. Lond. B* **84**-572, 308/319 (1911)
- 3) M. L. Shik, F. V. Severin, and G. N. Orlovskii: Control of walking and running by means of electrical stimulation of the midbrain, *Biophysics*, **11**, 659/666 (1966)
- 4) D. Owaki, T. Kano, K. Nagasawa, A. Tero, A. Ishiguro: Simple robot suggests physical interlimb communication is essential for quadruped walking, *Journal of The Royal Society Interface*, **10**-78, 20120669 (2013)
- 5) D. Owaki, A. Ishiguro: A Quadruped Robot Exhibiting Spontaneous Gait Transitions from Walking to Trotting to Galloping, *Scientific Reports*, **7**-1, 277 (2017)
- 6) A. E. Minetti, L. P. Ardigò, E. Reinach and F. Saibene: The Relationship between Mechanical Work and Energy Expenditure of Locomotion in Horses, *The Journal of Experimental Biology*, **202**-17, 2329/2338 (1999)
- 7) N. R. Deuel and L. M. Lawrence: Neck and shoulder motion of the gallop stride *Journal of Equine Veterinary Science*, **8**-3, 243/248 (1988)
- 8) H. H. F. Buchner, H. H. C. M. Savelberg, H. C. Schamhardt and A. Barneveld: Inertial Properties of dutch warmblood horses *Journal Biomechanics*, **30**-6, 653/658 (1997)
- 9) 鈴木 朱羅, 福原 洸, 大脇 大, 石黒 章夫: 頭部運動の活用による 四脚ロコモーションの歩容遷移, 第28回自律分散システム・シンポジウム, 112/115 (2016)
- 10) 大脇大, 鈴木朱羅, 福原洸, 石黒章夫: 頭部運動の活用した四脚ロボットの Walk-Pace-Rotary gallop 間歩容遷移, 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016, 1A2-05a1 (2016)
- 11) S. Suzuki, D. Owaki, A. Fukuhara and A. Ishiguro: Quadruped Gait Transition from Walk to Pace to Rotary Gallop by Exploiting Head Movement, *Conference on Biomimetic and Biohybrid Systems*, Springer International Publishing, 532/539 (2016)
- 12) R. Magnus: Cameron prize lectures on some results of studies in the physiology of posture, *THE LANCET*, **211**-531 (1926)
- 13) G. M. Shepherd: *Neurobiology*, Oxford University Press (1988)
- 14) S. Russell: Open dynamics engine, <http://ode.org>.